

CNC 공작 기계의 마찰력 보상을 위한 상호 결합 제어

Cross-Coupled Control for the Friction Compensation of CNC Machines

주정홍, 이현철, 이연정, 전기준

(Jeong-Hong Joo, Hyun-Chul Lee, Yun-Jung Lee, and Gi-Joon Jeon)

Abstract : In this paper, we propose a cross-coupled controller for compensating nonlinear frictions of the X-Y table of CNC machines. Due to the nonlinearity of frictions, large contour errors, referred to as quadrant glitches, occur when each axis of the X-Y table makes a zero velocity crossing. To reduce the quadrant glitches, the friction compensators and nonlinear friction observers for estimating Coulomb frictions are employed in the proposed method. A hyperbolic tangent function is used in reducing the magnitude of quadrant glitches and the CEM (Contour Error Model) is utilized for the estimation of the velocities. The performance of the proposed compensators is evaluated for several trajectories by computer simulations.

Keywords : cross-coupled control, friction compensator, contour error, CNC machining center, quadrant glitch

I. 서론

CNC 공작 기계를 이용한 공작물의 가공 정밀도는 가공품의 품질과 직결되므로 보다 고정밀의 가공을 위한 노력이 계속되고 있다[1]-[4]. 기존의 다축 CNC 공작 기계의 경우 각 축은 완전히 분리된 형태로 각각 독립적으로 제어된다. 그러나 이러한 분리된 형태의 제어 방법으로는 제어기 설계 과정에서 축 상호간에 미치는 영향에 대한 정확한 고려가 없다면 좋은 제어 성능을 기대할 수 없으며, 서로 다른 드라이버 동특성, 외부의 외란, 시스템 파라미터의 변화, 시스템의 비선형성 등에 의해 필연적으로 윤곽 오차가 발생하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 Koren[4]은 각 축의 추적 제어기와는 별도로 윤곽 오차를 고려하기 위한 상호 결합 제어를 추가하는 방법을 제안하였고, 그 후 CNC 공작 기계의 제어 분야에서 여러 개의 축을 동시에 고려하여 제어하는 문제에 대한 관심이 높아지고 있다[1][2]. 이는 각 축의 추적 오차와는 별도로 직접적으로 윤곽 오차를 줄이거나 제거시키는 방법이다.

CNC 공작 기계의 X-Y 테이블에 비선형 마찰력이 존재하는 경우, 이를 보상하기 위하여 Jee 등[5]은 자기 구성 퍼지 제어기(self organizing fuzzy logic controller)를 이용하였고, Tung 등[6]은 반복 제어에 근거한 피드포워드 제어를 구현하여 저속에서의 마찰력의 영향을 최소화하고자 하였다. 그러나 이러한 방법들은 많은 계산 양을 필요로 하거나[5][6], 부하 외란, 모델링 오차, 입력의 제한 정도에 따라 성능의 변화가 심하고, 학습된 데이터를 가지고 다른 이송 속도와 보간에 적용했을 때 좋은 성능을 발휘하리라 기대할 수 없다[6]. 또한 기존의 상호 결합 제어기로는 비선형 마찰력에 의해 발생하는 윤곽 오차를 효과적으로 감소시킬 수 없다.

따라서 본 논문에서는 비선형 마찰력을 보상하기 위한 새로운 상호 결합 제어를 제안한다. 제안한 보상 방법은 윤곽 정밀도의 향상을 위해 추적 제어기 앞에 상호 결합 제어기의 출력을 부가하며, 저속 영역에서 쿼던트 트 글리치(quadrant glitch : 원호를 가공할 경우 X-Y 테이블은 매 90°마다 속도가 0이 되는 지점을 지나게 되는데, 이때 각 축에 가해지는 마찰력의 방향이 바뀌게 되고 다른 지점에서 보다 상대적으로 큰 윤곽 오차가 발생하게 된다. 이때의 윤곽 오차를 말한다.)의 크기를 감소시키기 위해 하이퍼볼릭 탄젠트 함수(hyperbolic tangent function) 형태의 보상을 가하고, CEM(Contour Error Model)에서 구한 속도(출력의 위치와 가장 가까운 기준 궤적의 속도)를 사용함으로써, 속도가 0인 부근에서 적절한 보상을 가할 수 있게 한 것이다. 제안한 보상 방법은 CNC 공작 기계의 X-Y 서보 축을 대상으로 모의 실험을 수행하여 그 타당성을 검토하였다.

다음 장에서는 CNC 공작 기계에서 발생하는 윤곽 오차의 모델링 방법을 분석하고, 3장에서는 상호 결합 제어기의 구성에 대해 살펴보고, 4장에서는 모의 실험을 통해 제안한 보상 방법의 타당성을 검증하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 윤곽 오차

윤곽 오차는 가공 정밀도를 결정하는 중요한 특성 값으로 기준 궤적과 현재 공구 위치와의 최단 거리로 정의된다. 상호 결합 제어를 위하여 이러한 윤곽 오차는 매 샘플링 시간마다 실시간으로 계산되어야 한다. 그러나 일반적으로 임의의 경로에 대한 윤곽 오차는 실시간으로 정확히 계산하기 어려우므로 근사적인 윤곽 오차 모델링 방법들이 제안되었다.[1][2][4][7]. 본 논문에서는 주 등[7]이 제안한 윤곽 오차 모델링 방법을 사용하였으며, 그 방법은 다음과 같다.

CNC 공작 기계에서 임의의 곡선 가공시 보간기(interpolator)는 주어진 곡선을 보간하여 매 샘플링 시간마다 노트 포인트(knot point)를 생성하고, 이 점들 사이

접수일자 : 1997. 12. 12., 수정완료 : 1999. 4. 12.

주정홍 : 현대정공 공작기계 기술부

이현철, 이연정, 전기준 : 경북대학교 전자·전기공학부, 제어계측신기술연구센터

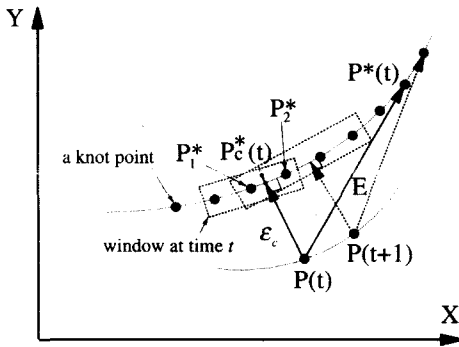


그림 1. 윤곽 오차.
Fig. 1. Contour error.

는 직선으로 간주하여 기준 궤적을 생성한다(그림 1 참조). 따라서 각 보간 주기 사이는 선형으로 근사화할 수 있다.

그림 1의 경우를 예로 들어 윤곽 오차 모델링 방법을 설명하면, CNC 공작 기계의 X-Y 테이블은 시간 지연 양이 존재하므로, 항상 기준 궤적의 현재 위치인 $P^*(t)$ 에서 시간 지연 양만큼 지연된 위치인 $P(t)$ 가 실제 공구의 위치가 된다. 따라서 현재 순간의 위치인 $P(t)$ 에서 기준 궤적의 과거의 점들과의 거리가 가장 짧은 두 점이 존재하게 된다. 이 두 점을 각각 P_1^* 와 P_2^* 라 놓으면, 윤곽 오차 ϵ_c 는 $P(t)$ 와 두 점 사이의 임의의 점인 $P_c^*(t)$ 와 가장 가까운 거리로써 정의할 수 있다.

현재 위치와 가장 가까운 두 점을 찾기 위해 기준 궤적 위의 많은 점들과 거리를 계산하게 되면 계산 시간이 많이 소요될 우려가 있으므로, 가변 윈도우를 이용한 방법을 사용한다. 즉, 적당한 크기의 윈도우를 정의해서 기준 궤적의 과거 값을 메모리에 저장하고, 현재 순간의 실제 궤적의 위치와의 거리를 구하면, 기준 궤적의 과거 데이터들 중에서 거리가 가장 짧은 두 점을 찾을 수 있다. 다음 순간의 실제 위치를 $P(t+1)$ 이라 하면, 이 순간의 윈도우의 시작은 그림 1에 나타낸 것처럼 P_1^* 이고, 이 점에서부터 현재 위치까지의 거리를 구해보면, 거리는 계속 줄어들다가 다시 증가하게 된다. 따라서 윈도우의 끝은 거리가 다시 증가하는 점이 된다. 이와 같이 윈도우를 반복적으로 새로이 정의함으로써 계산 양을 최소화하고 실행 시간을 줄일 수 있다. 실제 위치와 가장 가까운 두 점 P_1^* 와 P_2^* 를 찾기 위한 알고리즘은 그림 2와 같다.

그림 2의 알고리즘은 기준 궤적의 과거 값을 저장하고 이 값들과 현재 위치간의 거리를 구한 다음 거리의 변화를 보고 거리의 변화가 존재하면, 그 때의 k 값을 저장하고 현재 위치와 가장 가까운 두 점인 P_1^* 와 P_2^* 를 찾아내는 것이다. 따라서 천이 상태에서는 매 순간마다 윈도우의 크기는 변화하지만, 시스템이 정상 상태로 들어섬에 따라 윈도우의 크기는 3으로 고정된다.

이렇게 해서 찾은 두 점 사이는 다시 그림 3으로 나타낼 수 있으며, 이로부터 윤곽 오차를 계산하는 방법은 다음과 같다. 그림 3에서 θ 는 매 보간 주기마다 계산해

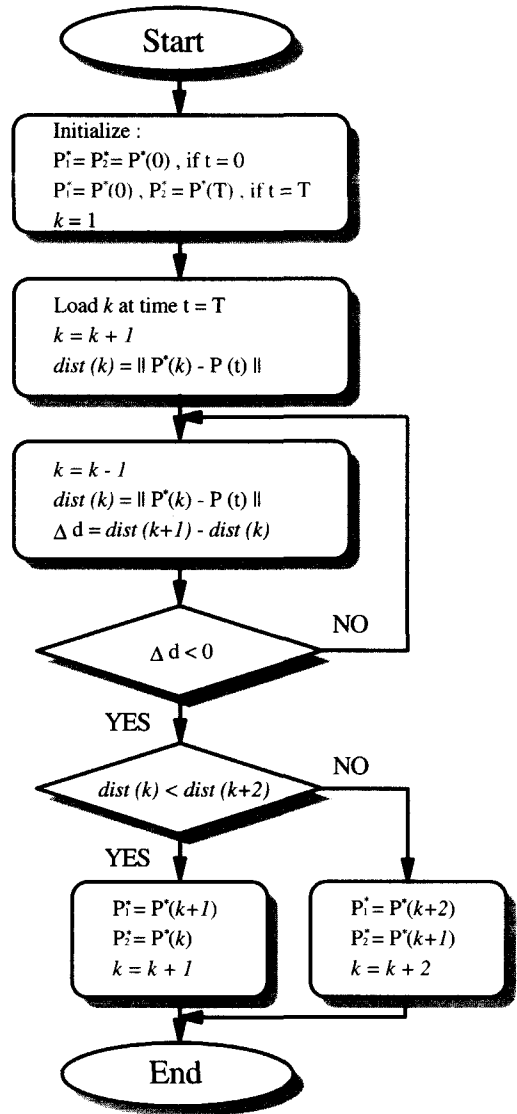


그림 2. P_1^* 와 P_2^* 를 찾기 위한 알고리즘.
Fig. 2. Algorithm for finding the knot points P_1^* and P_2^* .

야 할 값으로써

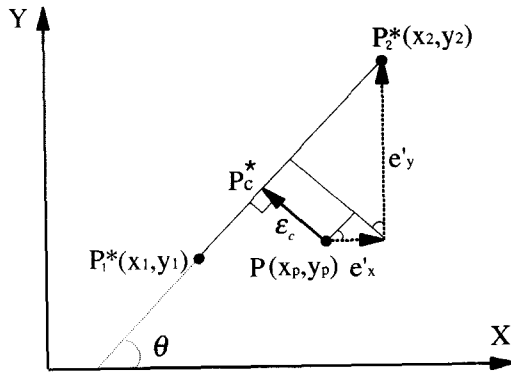
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (1)$$

이며, e_x' 은 $P(t)$ 와 P_2^* 의 X축의 오차 양이고, e_y' 은 Y축의 오차 양이다. 그러므로 기하학적인 모양에 의해 현재 순간의 윤곽 오차는

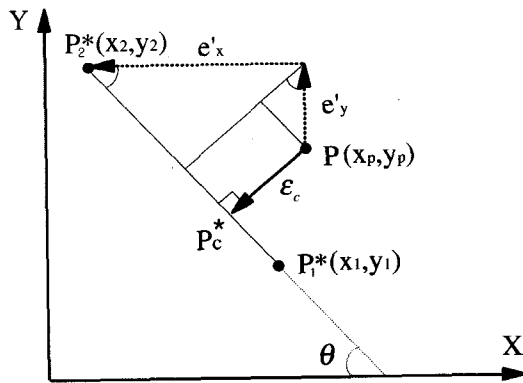
$$\epsilon_c = \begin{cases} e_y' \cos \theta - e_x' \sin \theta, & \text{if } x_2 \geq x_1 \\ e_x' \sin \theta - e_y' \cos \theta, & \text{if } x_2 < x_1 \end{cases} \quad (2)$$

이 된다.

따라서 위의 윤곽 오차 모델링 방법을 사용할 경우, 메모리를 이용하여 기준 궤적으로 생성되는 과거의 노트 포인트들을 기억하고 실제 위치와 가장 가까운 기준 궤적의 위치인 P_1^* 와 P_2^* 만 알면, 윤곽 오차를 계산할 수 있으므로 임의의 기준 궤적에 대해 모두 사용할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. 두 점과 윤곽 오차와의 관계. (a) $x_2 \geq x_1$ 인 경우, (b) $x_2 < x_1$ 인 경우.

Fig. 3. The relationship between two knot points and contour error. (a) In case of $x_2 \geq x_1$, (b) In case of $x_2 < x_1$.

III. 상호 결합 제어

현재 CNC 공작 기계에서 일반적으로 사용되는 X-Y 서보 축 제어기의 형태는 그림 4의 점선 부분을 제외한 구조와 같이 상호간의 연결이 전혀없는 형태로 각각의 축에 대하여 설계된다. 즉 각 서보 축은 완전히 분리된 각각의 단일 입·출력 시스템으로 간주된다.

이러한 각각의 분리된 단일 입·출력 제어 구조에 윤곽 정밀도를 향상시키기 위한 상호 결합 제어기는 Koren에 의해 제안되었다[4]. 그러나 CNC 공작 기계의 X-Y 테이블에 비선형 마찰력이 존재하는 경우, 이 마찰력에 의한 영향이 윤곽 오차로 나타나게 되고, 기존의 상호 결합 제어기로는 효과적으로 윤곽 오차를 감소시킬 수 없으므로 비선형 마찰력을 고려하기 위한 별도의 제어가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 비선형 마찰력을 효과적으로 감소시키기 위해 마찰력 보상 부분을 포함하는 상호 결합 제어기(그림 4의 점선 부분 참조)를 제안하였다.

1. 비선형 마찰력 관측자

간략한 마찰력 모델은 쿨롱 마찰(Coulomb friction), 스트라이백 마찰(Striback friction), 점성 마찰(viscous friction)의 합으로 나타낼 수 있다. 그 중에서 쿨롱 마찰

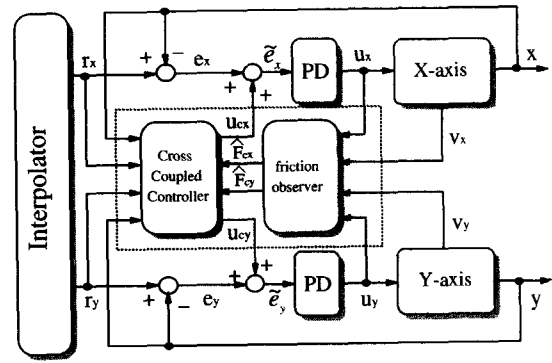


그림 4. X-Y 서보 축 제어기.

Fig. 4. X-Y servo-axes controllers.

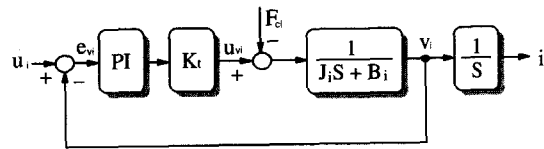


그림 5. 각 축의 구성.

Fig. 5. The composition of each axis.

과 스트라이백 마찰은 속도에 따라 비선형 특성을 나타내며, 점성 마찰은 선형 특성을 나타낸다. 그런데 이러한 마찰들 중에서 서보 축에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 쿨롱 마찰이기 때문에 본 논문에서는 쿨롱 마찰을 보상함으로써 마찰에 의한 영향을 최소화하고자 하였다. X-Y 테이블의 각 축에 존재하는 쿨롱 마찰력은 속도에 따른 불연속 함수로 나타낼 수 있다.

$$f_i(v_i, F_{ci}) = F_{ci} \text{sgn}(v_i), \quad i = x, y \quad (3)$$

여기서 $\text{sgn}(\cdot)$ 은 시그넘 함수(signum function)이고, F_{ci} 는 쿨롱 마찰력이고, 마찰력 관측자에서 관측해야 할 값이다. 이러한 비선형 마찰력이 존재하는 경우 X-Y 각 축의 동특성은

$$J_i \dot{v}_i + B_i v_i = u_{vi} - f_i(v_i, F_{ci}), \quad i = x, y \quad (4)$$

으로 간략화할 수 있고, 각각의 서보 축은 그림 5와 같이 속도 제어 루프를 포함한다.

각 축의 쿨롱 마찰력 F_{ci} 를 측정하기 위하여, 비선형 마찰력 관측자는

$$\hat{F}_{ci} = z_i - K |v_i|^a, \quad i = x, y \quad (5)$$

을 이용할 수 있다[8]. 여기서 K 와 a 는 설계 상수이고, 변수 z_i 의 변화량은

$$\dot{z}_i = K a |v_i|^{a-1} \left\{ \frac{1}{J_i} [u_{vi} - f_i(v_i, \hat{F}_{ci}) - B_i v_i] \right\} \text{sgn}(v_i) \quad (6)$$

으로 정한다. 여기서 $i = x, y$, $K > 0$, $a \geq 1$ 이고, 각 축의 속도 v_i 가 0이 아닌 속도로 제한(bound)된다면, 관측한 \hat{F}_{ci} 는 점진적으로 F_{ci} 로 수렴하게 된다. (5)와 (6)을 구현한 마찰력 관측자의 구성은 그림 6과 같다. 그림 6에서 비선형 함수는

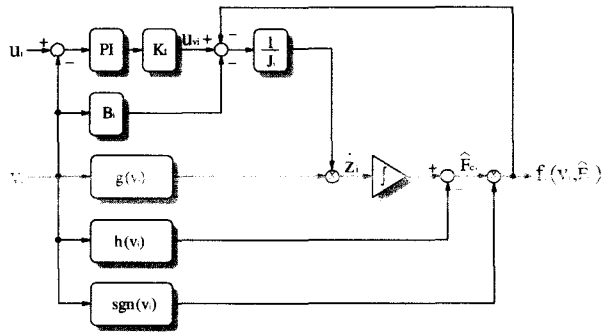


그림 6. 비선형 마찰력 관측자.
Fig. 6. Nonlinear friction observer.

$$g(v_i) = Ka|v_i|^{a-1}sgn(v_i) \quad (7)$$

$$h(v_i) = K|v_i|^a$$

이다.

그림 6에서 구현한 비선형 마찰력 관측자의 수렴성은 [8]과 유사한 방법으로 다음과 같이 증명할 수 있다. 각 축의 실제 쿨롱 마찰력 F_{ci} 와 관측된 쿨롱 마찰력 \widehat{F}_{ci} 의 오차를

$$e_i \equiv F_{ci} - \widehat{F}_{ci} \quad (8)$$

로 정의하면, e_i 의 변화율은 (9)와 같다. 따라서 $K > 0$, $a \geq 1$ 이고, 속도 v_i 가 0이 아닌 속도로 제한(bound)된다면, 각 축의 실제 쿨롱 마찰력 F_{ci} 와 관측된 마찰력 \widehat{F}_{ci} 의 차이인 e_i 는 점근적으로 0으로 수렴하게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_i &= -\dot{\widehat{F}}_{ci} \\ &= -\dot{z}_i(t) + Ka\dot{v}_i|v_i|^{a-1}sgn(v_i) \\ &= -\frac{1}{J_i}Ka|v_i|^{a-1}sgn(v_i)[f_i(v_i, F_{ci}) - f_i(v_i, \widehat{F}_{ci})] \\ &= -\frac{1}{J_i}Ka|v_i|^{a-1}e_i \end{aligned} \quad (9)$$

2. 마찰력 보상

본 논문에서 제한한 마찰력 보상 방법은 비선형 마찰력 관측자에 의해 관측된 각 축의 쿨롱 마찰력인 \widehat{F}_{cx} , \widehat{F}_{cy} 와 CEM에서 계산한 속도(실제 위치 $P(t)$ 와 가장 가까운 기준 궤적 $P_c^*(t)$ 에서의 속도)인 v_{cx} , v_{cy} 를 이용한 것이다. 상호 결합 제어기의 출력이 추적 제어기의 입력으로 부가되므로 마찰력에 대한 보상값은

$$\widehat{F}_{ci} = \frac{\widehat{F}_{ci}}{k_{pi}k_{spi}k_{ti}} \quad (10)$$

이 된다. 여기서 k_{pi} 와 k_{spi} 는 각각 추적제어기의 비례 이득과 속도 제어 루프의 비례이득이고, k_{ti} 는 모터의 토크 상수이다. 따라서 각 축의 마찰력 보상값은

$$\widehat{F}_i = \widehat{F}_{ci} \frac{1 - e^{(-v_i/\delta_i)}}{1 + e^{(-v_i/\delta_i)}} sgn(\widehat{F}_{ci}), \quad i = x, y \quad (11)$$

이 된다. 여기서 δ_i 는 저속 구간을 설정해주는 설계 상수이다.

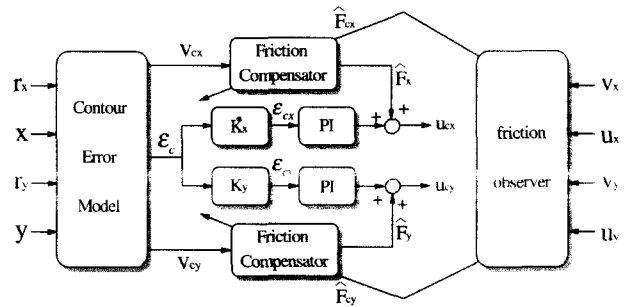


그림 7. 제안한 상호 결합 제어기.
Fig. 7. The proposed cross-coupled controller.

그림 4에서와 같이 상호 결합 제어기의 출력이 추적 제어기 앞에 인가되므로, 저속 구간에서 쿨롱 마찰력이 속도의 방향이 변함에 따라 불연속적으로 바뀌면, 갑자기 변화하는 제어 입력이 추적 제어기의 미분 제어 부분에 의해 증폭되고, 이로 인해 윤곽 오차는 저속 영역에서 쿼드런트 글리치의 크기가 커지게 되는 역효과를 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 (11)에서처럼 하이퍼볼릭 탄젠트 함수 형태의 보상을 가함으로써 저속에서의 불연속성을 없애므로써 쿼드런트 글리치의 크기가 감소되도록 하였다.

3. 상호 결합 제어기의 구성

3.1절에서 설명한 비선형 마찰력 관측자와 3.2절의 마찰력 보상기를 포함하는 상호 결합 제어기의 구조는 그림 7과 같다. 그림 7에서 CEM은 매 샘플링 시간마다 각 축의 기준 궤적의 위치인 r_x , r_y 와 실제 궤적의 위치인 x , y 를 입력으로 받아들이고, 2장에서 설명한 방법으로 실제 위치인 $P(t)$ 와 가장 가까운 기준 궤적의 두 점인 $P_1^*(t)$, $P_2^*(t)$ 를 구한 다음 윤곽 오차 ϵ_c 를 구한다.

그리고 실제 궤적의 현재 위치인 $P(t)$ 와 가장 가까운 기준 궤적의 위치인 $P_c^*(t)$ 에서의 각 축의 속도인 v_{cx} , v_{cy} 를 구하기 위해, 윤곽 오차를 각 축의 성분으로 분리하면,

$$\epsilon_{cx} = K_x \epsilon_c, \quad \epsilon_{cy} = K_y \epsilon_c \quad (12)$$

이 되고, 여기서 K_x , K_y 는

$$\begin{cases} K_x = -\sin\theta, K_y = \cos\theta, & \text{if } x_2 \geq x_1 \\ K_x = \sin\theta, K_y = -\cos\theta, & \text{if } x_2 < x_1 \end{cases} \quad (13)$$

이다. 따라서 $P(t)$ 와 가장 가까운 기준 궤적의 위치는

$$P_c^*(t) = \begin{bmatrix} r_{cx} \\ r_{cy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + K_x \epsilon_c \\ y + K_y \epsilon_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

이 되고, 현재 위치와 가장 가까운 기준 궤적에서의 각 축의 속도는

$$\begin{aligned} v_{cx} &\cong [x(t) - x(t-1)]/T \\ v_{cy} &\cong [y(t) - y(t-1)]/T \end{aligned} \quad (15)$$

으로 근사화할 수 있다. 여기서 T 는 샘플링 주기이다.

$$\begin{aligned} \hat{u}_x &= k_{cPx} \varepsilon_{cx} + k_{clx} \int_t \varepsilon_{cx} d\tau \\ \hat{u}_y &= k_{cPy} \varepsilon_{cy} + k_{cly} \int_t \varepsilon_{cy} d\tau \end{aligned} \quad (16)$$

윤곽 오차 모델에서 계산한 윤곽 오차 ε_c 는 각 축의 성분으로 분리해서 ($\varepsilon_{cx}, \varepsilon_{cy}$), 비례 적분 제어기를 통과하여 (16)과 같은 제어 결과를 내놓게 된다. 여기서 k_{cPx} 와 k_{cPy} 는 각각 상호 결합 제어기의 비례이득이고, k_{clx} 와 k_{cly} 는 각각 상호 결합 제어기의 적분이득이다.

마찰력 관측자는 매 샘플링 시간마다 각 축의 속도 v_x, v_y 와 각 축의 전류 제어 루프로의 입력인 u_x, u_y 를 입력으로 받아들이고, 관측한 각 축의 쿨롱 마찰력 \widehat{F}_{cx} 와 \widehat{F}_{cy} 를 마찰력 보상기로 보낸다. 그리고 마찰력 보상기에서는 v_{cx}, v_{cy} 에 따라서 각 축의 마찰력에 대한 보상값인 \widehat{F}_x 와 \widehat{F}_y 를 내보낸다. 따라서 상호 결합 제어기에서의 제어 출력은

$$\begin{aligned} u_{cx} &= \widehat{F}_x + \hat{u}_x \\ u_{cy} &= \widehat{F}_y + \hat{u}_y \end{aligned} \quad (17)$$

이 된다.

IV. 모의 실험

제안한 마찰력 보상 방법으로 얼마나 효과적으로 윤곽 오차를 감소시킬 수 있는지 확인하고, 그 타당성을 검토하기 위해 CNC 공작 기계의 X-Y 서보 축의 모델을 대상으로 다음과 같은 경우에 대해 모의 실험을 수행하였다.

먼저 4.1절에서는 퀴드런트 글리치에 대해 보다 자세히 살펴보고, 상호 결합 제어기의 제어 위치에 따른 윤곽 제어 성능의 차이를 나타내었다. 그리고 4.2절에서는 비선형 마찰력 관측자의 관측 결과와 함께 속도에 따른 마찰력 보상과 보상 방법에 따른 퀴드런트 글리치의 크기를 비교하였다. 마지막으로 4.3절에서는 본 논문에서 제안한 보상 방법을 종합하여 각각의 보간 방법에 따른 윤곽 제어 성능을 나타내었다. 상호 결합 제어기에 사용된 파라미터는 표 1과 같고, 모의 실험에서 사용한 각 축의 파라미터는 표 2에 나타냈다.

1. 상호 결합제어기의 제어 위치에 따른 윤곽 오차

이 절에서는 인볼루트 가공에서 발생하는 퀴드런트 글리치에 대해 살펴보고, 상호 결합 제어기의 제어 위치에 따른 윤곽 오차를 비교한다. 인볼루트 경로는 기준 궤적의 속도가 계속해서 변화하므로 퀴드런트 글리치의 특성을 잘 나타내는 기어동 기계부품의 형상 곡선의 가공에 사용된다. 인볼루트 보간인 경우, 보간기는 초기 원의 반지름이 R 이고, 테이블의 이송 속도가 F 일 때,

$$\theta = \sqrt{\frac{2Ft}{R}} \quad (18)$$

의 비율로 각 축의 기준 궤적이

표 1. 상호 결합 제어기의 파라미터.

Table 1. Parameters of the cross-coupled controller.

	k_{cP}	k_{cI}	α	δ
X-axis	15	200	1.2	0.22
Y-axis				0.17

표 2. 모의 실험에서 사용한 각 축의 파라미터.

Table 2. Parameters of each axis used in simulations.

		X-axis	Y-axis
Tracking controller gains	k_P	5.5	
	k_d	0.02	
Current controller gains	k_{sP}	1.3	
	k_{sI}	2.35	
Inertia	$J(kgm^2)$	0.0103	0.012
Viscous friction	$B(Nms)$	0.0336	0.0308
Coulomb friction	$F_c(Nm)$	3	2
Torque constant	$k_t(Nm/A)$	21.04	
Sampling time	$T(ms)$	1	

$$x = R[\cos \theta + \theta \sin \theta] + x_0 \quad (19)$$

$$y = R[\sin \theta - \theta \cos \theta] + y_0$$

이 되도록 매 보간 주기마다 노트 포인트를 생성한다. 여기서 x_0, y_0 는 초기 원의 중심점이고, 테이블의 이송 속도는 $F = 50 \text{ mm/sec}$, 초기 원의 반지름은 $R = 1 \text{ mm}$ 이다. 인볼루트 보간 시의 테이블의 이송은 그림 8과 같다.

그림에서 \times 표시한 지점이 마찰력의 방향이 변화하는 곳이므로 다른 지점에서 보다 윤곽 오차가 상대적으로 큰 퀴드런트 글리치가 발생하는 곳이다.

일반적인 마찰력 보상 위치와 Koren이 제안한 상호 결합 제어기의 제어 위치는 추적 제어기 뒤이지만, Chuang[2]의 논문에서와 마찬가지로 본 논문에서는 추적제어기 앞에 상호 결합 제어 출력을 부가함으로써 윤곽 제어 성능을 높이고자하였다. 이에 대한 비교 결과를 그림 9와 표 3에 나타냈다. 표에서 ε_{cpeak} 는 윤곽 오차의 최대값을 나타내고 단위는 μm 이며, ε_{cISE} 는 윤곽 오차의 제곱을 합한 값을 나타내고 단위는 μm^2 이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 상호 결합 제어기의 출력을 추적 제어기 앞에 가함으로써 윤곽 오차의 최고 값을 50% 이상 감소시킬 수 있었다.

2. 속도와 제어방법에 따른 마찰력 보상

비선형 마찰력 관측자에 의해 관측된 각 축의 마찰력 관측 결과를 그림 10에 나타냈다. 그림 10(a)는 구형과 형태입력을 가했을 때 관측된 마찰력이고, 그림 10(b)는 인볼루트 보간을 했을 때, 관측된 마찰력에 대한 그림이다. 처음에는 정확한 마찰력을 관측할 수 없지만 시간이 지남에 따라 실제 마찰력을 관측해냄을 알 수 있다.

다음으로 속도에 따른 마찰력 보상과 마찰력 보상 방

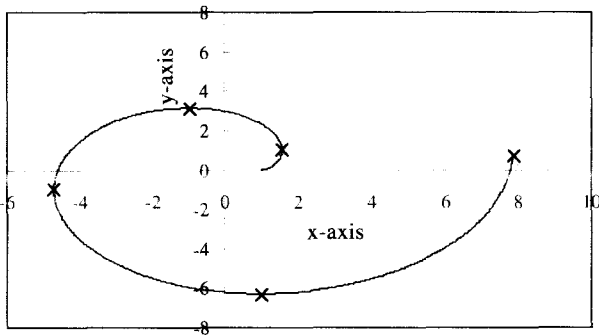


그림 8. 인볼루트 보간에 대한 X-Y 테이블의 이송.
Fig. 8. Feed of a X-Y table for an involute contour.

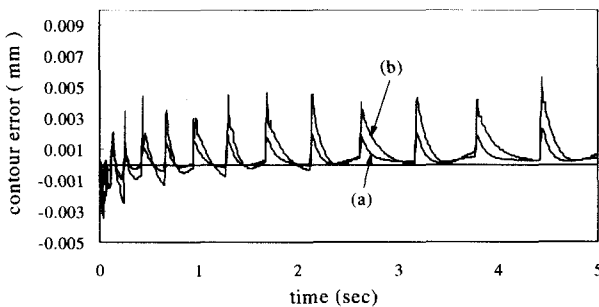


그림 9. 상호 결합 제어기의 위치에 따른 제어결과.
(a) 추적 제어기 앞, (b) 추적 제어기 뒤.
Fig. 9. The results for the position of a CCC. (a) In front of tracking controllers, (b) Behind tracking controllers.

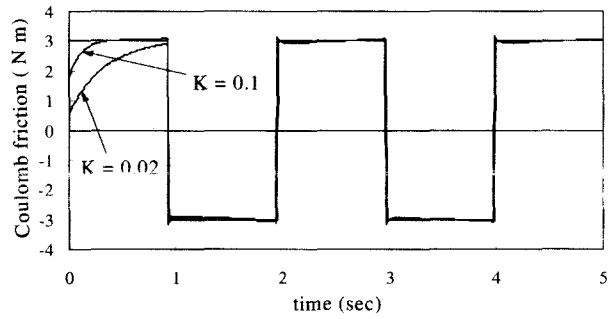
표 3. 상호 결합 제어기의 제어 위치에 대한 윤곽 오차의 비교.

Table 3. The comparison of contour errors for the position of a CCC.

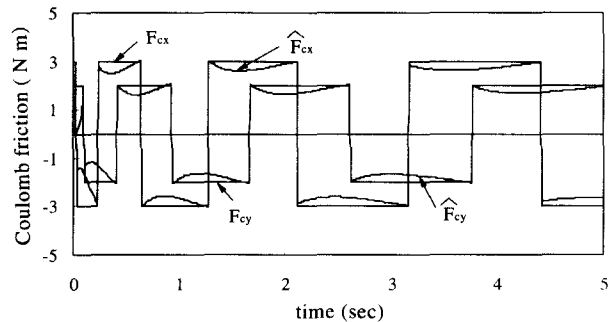
	추적 제어기 앞	추적 제어기 뒤
ϵ_{cpeak}	2.3	5.5
ϵ_{cISE}	210	998

법에 따른 쿼드런트 글리치의 크기를 비교하였다. 그림 11과 표 4에서는 속도에 따른 마찰력 보상 결과를 나타냈다. 그림 11(a)는 출력의 속도 v 로써 마찰력을 보상한 경우인데, 출력의 속도로써 마찰력을 보상하면, 저속 영역에서 적절한 보상값을 설정할 수 없으므로 쿼드런트 글리치의 크기는 커지게 된다. 시간지연이 X-Y 테이블에 존재하므로 기준 궤적의 속도 v_c 로써 마찰력을 보상하면, 실제 마찰력의 방향이 바뀌는 것보다 먼저 보상값의 부호가 바뀌게 되므로 그림 11(b)에서처럼 역효과를 나타낸다. CEM에서 계산한 실제 위치와 가장 가까운 기준 궤적에서의 속도 v_c 를 사용한 경우 실제 마찰력의 방향이 바뀌는 순간을 찾아내므로 저속 구간에서 적절한 보상을 가할 수 있고, 쿼드런트 글리치를 현저히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 12와 표5는 마찰력 보상 방법에 의한 결과이다.



(a)



(b)

그림 10. 마찰력 관측 결과. (a) K값에 대한 마찰력 관측 결과, (b) 인볼루트 보간에 대한 마찰력 관측 결과.

Fig. 10. The results of friction observer. (a) The observed results of frictions for the parameter K, (b) The observed results of frictions for an involute contour.

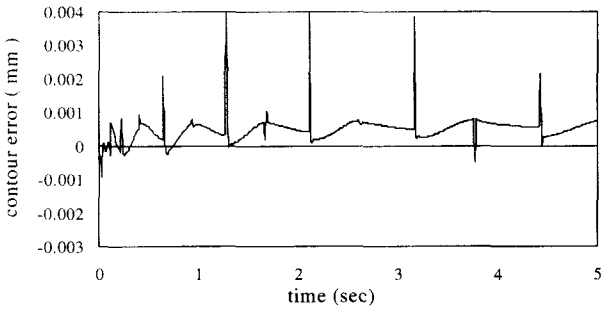
그림 12(a)는 시그넘 함수 형태의 보상을 가한 경우이고, 그림 12(b)는 하이퍼볼릭 탄젠트 함수 형태의 보상을 가한 경우이다. 보상 방법으로써 하이퍼볼릭 탄젠트 함수를 이용함으로써 저속 구간에서 갑작스런 제어 입력의 변화를 완화시킬 수 있었고, 저속 구간에서의 쿼드런트 글리치의 크기를 현저히 감소시킬 수 있었다.

3. 보간 방법에 따른 마찰력 보상

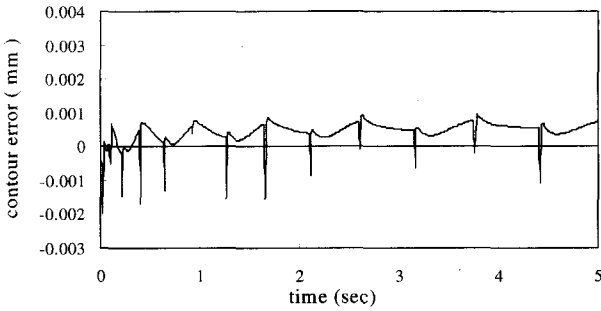
마지막으로 본 논문에서 제안한 마찰력 보상 방법을 종합하여 즉, 추적 제어기 앞에 상호 결합 제어기의 출력을 인가하고, 속도로써 v_c 를 사용하며 보상 방법으로써 하이퍼볼릭 탄젠트 함수 형태를 사용하였을 때, 인볼루트, 원호, 코너 보간에 따른 윤곽 제어 성능을 나타내었다.

그림 13과 표 6은 마찰력 보상을 가한 경우와 하지 않은 경우, 인볼루트와 원호 보간에 대한 비교 결과이다. 두 경우 모두 제안한 보상 방법의 사용으로 마찰력에 의한 영향을 효과적으로 감소시킴으로써 윤곽 오차를 줄일 수 있음을 볼 수 있다.

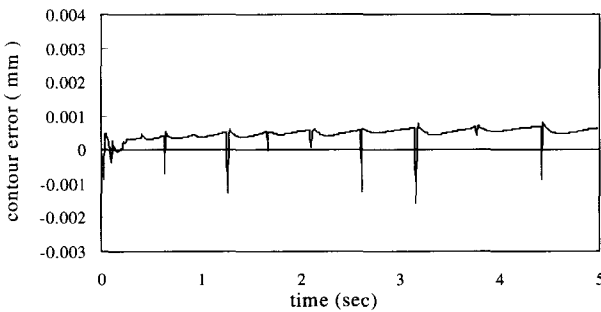
그림 14와 표 7은 가감속을 하지 않고 코너를 가공할 때의 제어 결과이다. 그림 14(b)는 코너 근처에서 기준 궤적과 실제 궤적을 비교한 것으로 점선은 기준 궤적을 나타내며, 실선은 마찰력을 보상한 경우이고, 일점쇄선은



(a)



(b)



(c)

그림 11. 속도에 따른 마찰력 보상 결과. (a) 출력의 속도를 이용, (b) 기준 궤적의 속도 이용, (c) CEM에서 구한 속도 이용.

Fig. 11. The compensating results for three kinds of velocities. (a) Using output velocities, (b) Using reference velocities, (c) Using the velocities estimated by CEM.

표 4. 속도에 대한 윤곽 오차의 비교.

Table 4. The comparison of contour errors for three kinds of velocities.

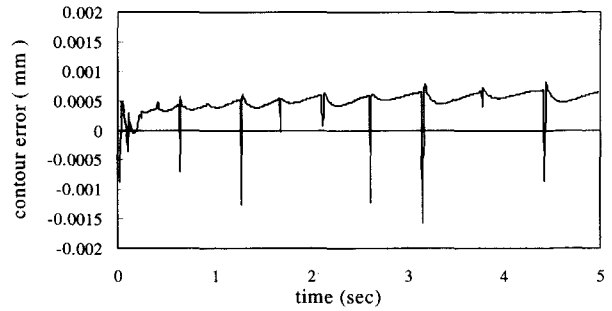
	출력의 속도	기준 궤적의 속도	CEM에서 구한 속도
ϵ_{cpeak}	4.37	1.94	1.58
ϵ_{cISE}	193.1	147.9	134.4

보상하지 않은 경우이다. 서보 축의 기준 속도가 불연속적인 코너 가공에서도 제안한 보상 방법을 이용함으로써 마찰력에 의해 나타나는 윤곽 오차의 크기를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

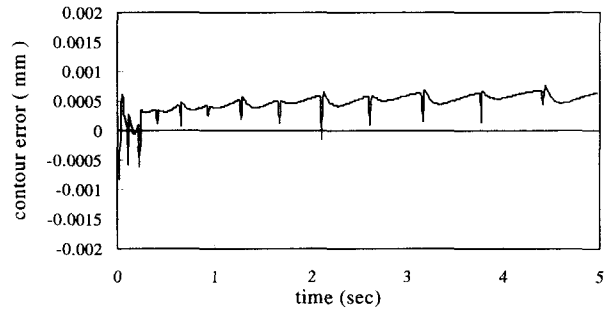
표 5. 보상 방법에 대한 윤곽 오차의 비교.

Table 5. The comparison of contour errors for compensation methods.

	시그넘 함수의 경우	하이퍼볼릭 탄젠트 함수의 경우
ϵ_{cpeak}	1.58	0.83
ϵ_{cISE}	134.4	125.8



(a)



(b)

그림 12. 마찰력 보상 방법에 따른 제어 결과. (a) 시그넘 함수의 경우, (b) 하이퍼볼릭 탄젠트 함수의 경우.

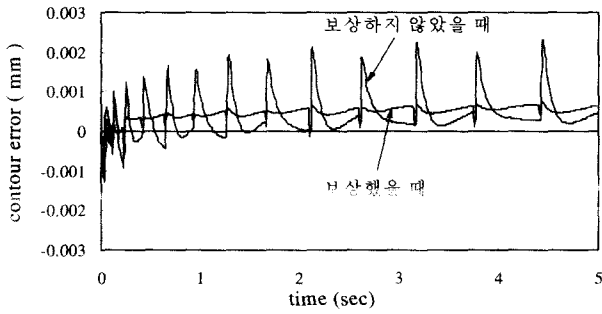
Fig. 12. The results for compensation methods. (a) In case of the signum function, (b) In case of the hyperbolic tangent function.

표 6. 마찰력 보상 결과 비교.

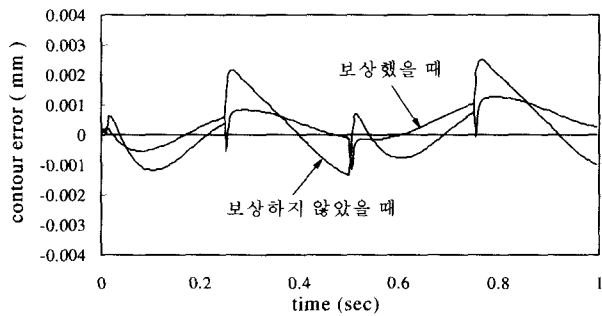
Table 6. The comparison of friction compensation results.

	인볼루트 보간		원호 보간	
	보상하지 않았을 때	보상했을 때	보상하지 않았을 때	보상했을 때
ϵ_{cpeak}	2.3	0.83	2.5	1.3
ϵ_{cISE}	210	125.8	197	76

이상의 모의 실험 결과를 통하여 상호 결합 제어기는 추적 제어기 앞에 사용함으로써 보다 효과적으로 윤곽 오차를 감소시킬 수 있음을 알 수 있었고, 제안한 마찰력 보상 방법을 상호 결합 제어기에 부가함으로써 효과적으로 윤곽 오차를 감소시킬 수 있음을 인볼루트, 원호 그리고 코너 가공에 대해 적용함으로써 확인하였다.



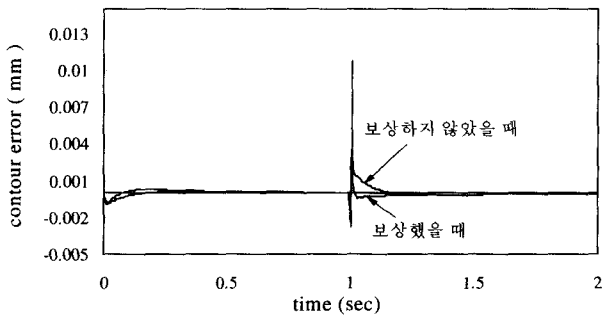
(a)



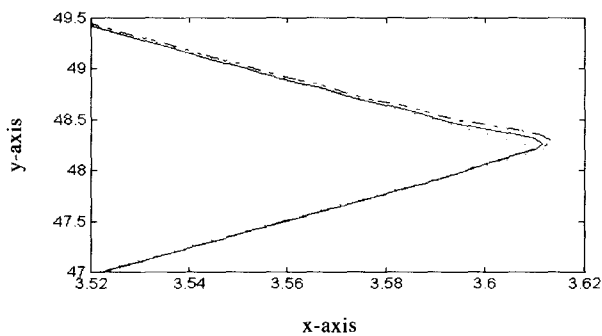
(b)

그림 13. 마찰력 보상 결과. (a) 인볼루트 보간, (b) 원호 보간.

Fig. 13. Friction compensation results. (a) An involute contour, (b) A circular contour.



(a)



(b)

그림 14. 코너 가공에서의 보상 결과. (a) 윤곽 오차, (b) 코너.

Fig. 14. Friction compensation results for a corner shape. (a) Contour error, (b) Corner.

표 7. 코너 가공에서의 결과 비교.

Table 7. The comparison of results for a corner shape.

	보상하지 않았을 때	보상했을 때
ϵ_{cpeak}	10.7	3.5
ϵ_{cISE}	177	34

VII. 결론

본 논문에서는 CNC 공작 기계의 보다 정밀한 윤곽 제어를 위하여, X-Y 테이블에 존재하는 마찰력을 보상하기 위한 비선형 마찰력 보상기를 포함하는 상호 결합 제어를 제안하였다. 제안한 마찰력 보상 방법은 CEM에서 계산한 실제 위치와 가장 가까운 기준 궤적에서의 속도를 사용함으로써 실제 마찰력의 방향이 바뀌는 순간을 찾아내므로 저속 구간에서 적절한 보상을 가할 수 있음을 확인하였고, 하이퍼볼릭 탄젠트 형태의 보상을 가함으로써 저속에서 제어 입력의 급격한 변화를 완화하여 킥드린트 글리치의 크기를 감소시킬 수 있음을 인볼루트와 원호 보간에 대해 모의실험을 수행함으로써 확인하였다. 그리고 제안한 보상 방법이 서보 축의 기준 속도가 불연속적으로 변화하는 코너 가공에서도 마찰력에 의해 나타나는 윤곽 오차의 크기를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

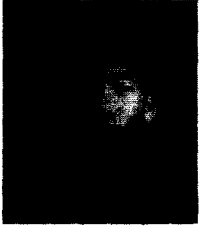
- [1] K. Srinivasan and P. K. Kulkarni, "Cross-coupled control of biaxial feed drive servomechanisms," *ASME Trans. J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 112, no. 2, pp. 225-232, June, 1990.
- [2] H. Y. Chuang and C. H. Liu, "Techniques in cross-coupled digital adaptive feedrate control for multiaxis machine tools," *Control and Dynamic Systems*, vol. 72, pp. 265-301, Sept., 1996.
- [3] H. Z. Bin, K. Yamazaki, and M. F. DeVries, "A microprocessor-based control scheme for the improvement of contouring accuracy," *Annals of the CIRP*, vol. 32, no. 1, pp. 275-279, 1983.
- [4] Y. Koren, "Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems," *ASME Trans. J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 102, no. 4, pp. 265-272, Dec., 1980.
- [5] S. C. Jee and Y. Koren, "A self-organizing fuzzy logic control for friction compensation in feed drives," *Proc. 1993 American Control Conference*, pp. 205-209, 1993.
- [6] E. D. Tung, "Low velocity friction compensation and feedforward solution based on repetitive control," *ASME Trans. J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 115, pp. 279-284,

June, 1995.

[7] 주정홍, 이현철, 이연정, 전기준, "CNC 공작 기계의 상호 결합 제어를 위한 새로운 윤곽 오차 모델링 방법," 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제3권, 제

4호, pp. 389-397, 1997. 8.

[8] B. Friedland and Y. J. Park, "On adaptive friction compensation," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 37, no. 10, pp. 1609-1612, Oct., 1992.



주 정 홍

1971년 3월 19일생. 1995년 창원대학교 전자공학과 학사. 1998년 경북대학교 대학원 전자공학과 석사. 1998년-현재 현대정공 기술연구소 연구원. 주관심분야는 CNC 제어기, 지능 제어.

이 현 철

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제3권, 제4호, 참조.

이 연 정

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제2권, 제1호, 참조.

전 기 준

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제2권, 제1호, 참조.